

Утренние отключения воздушных линий электропередачи за десятки лет так и не получили исчерпывающего объяснения. Отключения такого вида не приносят осязаемого ущерба, но приводят к ряду неприятных последствий. Ток короткого замыкания, стекая через фундамент опоры, вызывает опасное напряжение прикосновения и шаговое напряжение, индуцирует наведенные напряжения в линиях связи, а также в нефте- и газопроводах, проходящих в непосредственной близости параллельно трассе ВЛ. При отключениях и повторных включениях ВЛ срабатывает ресурс выключателей, возникают перенапряжения и мощные помехи во вторичных цепях подстанционного оборудования.

Наши сибирские авторы в своем материале обращают внимание на высокочастотные перенапряжения, роль которых в утренних отключениях ВЛ практически никогда не обсуждалась широким кругом специалистов.

ОТКЛЮЧЕНИЯ ОТПАЕЧНЫХ ЛИНИЙ ВЛ 110 кВ

Влияние высокочастотных перенапряжений

Василий Боровицкий,
заместитель главного инженера
ОАО «Тюменьэнерго»,
г. Сургут

Александр Овсянников,
д.т.н., профессор кафедры
техники и электрофизики высоких
напряжений НГТУ,
г. Новосибирск

Эксплуатирующие организации постоянно озабочены проблемой утренних отключений воздушных линий электропередачи (ВЛ). Установить причину их возникновения во многих случаях не удается [1], (табл. 1).

Обычно рассматривают две причины утренних отключений ВЛ, различающиеся по сути, но трудно отличимые по признакам: вмешательство птиц и перекрытие гирлянд при увлажнении загрязненной поверхности изоляторов утренним туманом, росой, морозящим дождем, мокрым снегом или жидким налетом.

В некоторых случаях рассматривается сочетанное действие первого и второго явлений.

Проблеме птичьих отключений посвящено много работ [1, 2]. Механизм перекрытия увлажненной и загрязненной изоляции встречается в районах с интенсивным загрязнением атмосферы [3]. Однако в районах с относительно чистой атмосферой влагоразрядный механизм перекрытия не подтверждается лабораторными испытаниями демонтированных с ВЛ изоляторов: во всех случаях влагоразрядные характеристики превышают наибольшее рабочее напряжение линии, хотя по показаниям вольтметров на подстанциях по концам линии напряжение перед перекрытием изоляции оставалось в нормируемых пределах.

Рассмотрим еще одну причину, которая до сих пор не обсуждалась в известных нам публикациях. Речь пойдет о воздействии на изоляцию локальных коммутационных перенапряжений, которые могут возникнуть, например, при отключениях нагрузки на отпаечных линиях. На ВЛ 110 кВ, широко распространенных в электросетевом комплексе, наличие отпаек – явление достаточно привычное. Нередко отпайки построены для электроснабжения промышленных или сельскохозяйственных комплексов, которые при одно- или двухсменном режиме работы, т.е. при сбросе и вводе нагрузки, приводят к некоторым возмущениям режима работы линии электропередачи.

При небольшой длине отпайки переходные процессы сопровождаются перенапряжениями достаточно высокой частоты.

Важно, что эти перенапряжения могут привести к перекрытию загрязненной и увлажненной изоляции на ВЛ, но при этом не фиксируются на подстанциях по концам ВЛ. Тогда становится понятным, почему при испытаниях в лаборатории демонтированные с линии гирлянды изоляторов имеют влагоразрядные напряжения перекрытия больше наибольшего рабочего напряжения ВЛ. Данная гипотеза родилась при анализе многочисленных отключений некоторых ВЛ 110 и 220 кВ.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Для расчета в программе МАЭС [4] одна из реальных схем электропередачи 110 кВ была предельно упрощена: в ней была оставлена одна отпайка, а сброс нагрузки моделировался отключением ПС3, питаемой через отпадку (рис. 1).

Питающая и приемная ПС (ПС1 и ПС2) в пакете МАЭС моделировались с учетом параметров:

- амплитуда ЭДС – $U_{ф.м.} = 103 \text{ кВ}$ ($U_{н.р.} = 126 \text{ кВ}$ или $1,15 U_{ном}$);
- круговая частота – $314,1593 \text{ рад/с}$;
- начальная фаза: ПС1 – 0; ПС2 – $0,015 \text{ рад}$.

Туликовая ПС3 моделировалась активно-индуктивной нагрузкой с $\cos\phi = 0,5$ ($R = 1000 \text{ Ом}$; $L = 3 \text{ Гн}$).

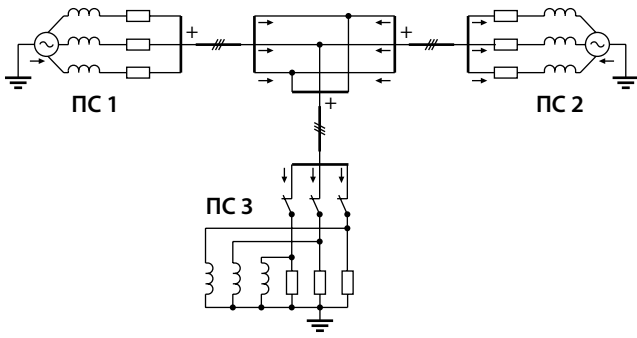
Значения других параметров ПС1 и ПС2 (индуктивное и активное сопротивления по прямой и нулевой последовательностям) и ВЛ (погонные индуктивные и активные сопротивления и емкостная проводимость по прямой и нулевой последовательностям) были получены в результате расчетов в пакете MatLab по методикам, изложенным в [5].

Длина линии между ПС1 и ПС2 выбиралась равной 100 км. Расчеты проводились для двух отпаек: отпайка А была на расстоянии 30 км от ПС № 1 и имела длину 5 км; отпайка Б включалась посередине линии и имела длину 20 км.

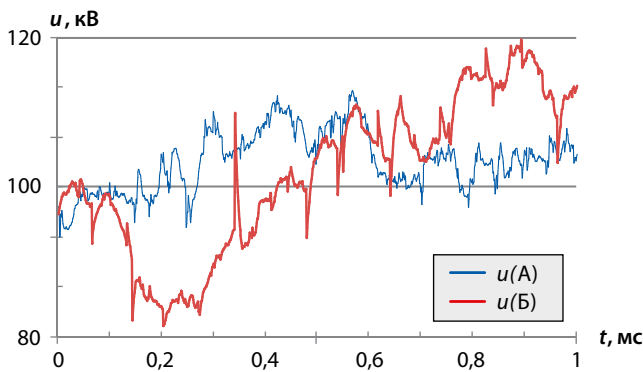
• Таблица 1. Процент отключений ВЛ по неустановленной причине по данным [1]

Россия	Украина		Германия	ЮАР	Швеция	Финляндия
35–110 кВ	110 кВ	330 кВ	500 кВ	6 кВ и выше	132 кВ	110 кВ
40%	60%	30%	28%	50%	38%	21%

Упрощенная схема ВЛ 110 кВ «ПС1 – ПС2» с отпайкой на ПС3 **Рис. 1**

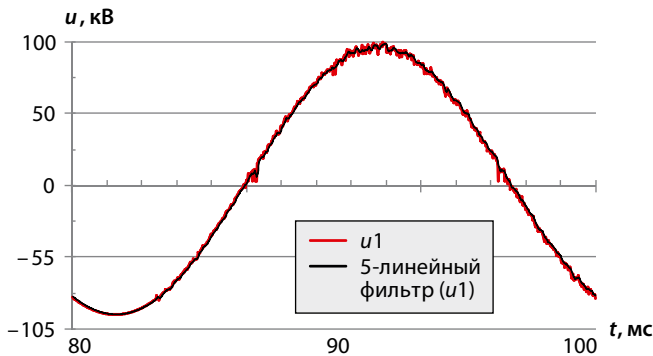


Фазные напряжения в конце отпайки А и Б при отключении ПС3 **Рис. 2**



1/2

Фазное напряжение на выходе с ПС1 при отключении отпайки А **Рис. 3**



Коммутации производились выключателями с токами среза около 10 А, т.е. имитировался достаточно плохой но вполне реальный случай работы выключателя. В расчетах варьировалась нагрузка на ПС3. При коммутируемой мощности намного меньшей, чем транзитная, $S_3 = 0,1 S_2$ перенапряжения были невелики и составили $K_{пер} = 1,01 \div 1,03 U_{н.р.м.}$. Основные расчеты были проведены для $S_3 = 0,6 S_2$, т.е. для наиболее неблагоприятных, но имевших место в реальности случаев.

Результаты расчетов приведены на рис. 2 для случаев отключения отпайки А и Б с указанным выше отношением мощностей $S_3 = 0,6 S_2$. Момент отключения нагрузки примерно совпадал с максимумом переменного напряжения на фазе С. На ней же возникали наибольшие перенапряжения.

На рис. 3 приведена расчетная осциллограмма фазного напряжения на выходе с ПС1 при отключении отпайки А в момент амплитудного значения напряжения.

Видно, что после коммутации форма напряжения слегка искажена наложенными высокочастотными колебаниями в те-

• Рис. 4. Участок ВЛ вблизи отпайки и с солончаками на почве



чение времени, примерно равном полупериоду напряжения. Линейная фильтрация осциллограммы имитировала запись возможной аварийной осциллограммы «черным ящиком». На ней высокочастотные перенапряжения практически не видны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

При выбранных параметрах модели максимальные перенапряжения возникали на отпайках и составили около 120 кВ, что соответствовало коэффициенту перенапряжения $K_{пер} \approx 1,18$.

Поскольку процесс перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции имеет некоторую инерционность, то представляется очевидным, что на вероятность перекрытия должна влиять не только амплитуда, но и длительность перенапряжения. В этом смысле, исходя из вида осциллограмм, приведенных на рис. 2, можно было предположить, что наиболее вероятные места перекрытия изоляции должны сосредотачиваться вблизи и на отпайке Б (120 кВ с длительностью около 0,2 мс).

Вблизи питающей ПС1 и приемной ПС2 перекрытия маловероятны из-за меньшей амплитуды и короткой длительности импульсов перенапряжения.

Заметим, что если бы в расчетах было учтено затухание импульсных перенапряжений при их распространении по ВЛ за счет потерь в земле, тросах и проводах (скин-эффект), то на ПС перенапряжения имели бы еще меньшие кратности.

Расчеты и знание характеристик реальных устройств для измерения напряжения на ПС в какой-то мере объясняют тот факт, что отключения ВЛ возникают якобы при неизменной величине напряжения. Действительно короткие и знакопеременные импульсы напряжения, наложенные на синусоиду, практически не влияют на действующее значение напряжения, что демонстрируется на рис. 3. Кроме того, надо помнить о том, что в соответствии с частотными характеристиками измерительных трансформаторов напряжения и при реально существующей недостаточно большой частоте дискретизации высокочастотные перенапряжения не фиксируются и «черны-

ми ящиками», которые при отключениях ВЛ срабатывают от действия релейной защиты. На реальной ВЛ наиболее часто перекрытия изоляции (в случаях, когда они были обнаружены) возникали на участке ВЛ с солончаковыми почвами (рис. 4) и в пяти пролетах от отпайки Б.

Таким образом, есть источник загрязнения и увлажнения изоляции и возможность локального повышения напряжения при сбросе нагрузки при сбросе нагрузки на отпаечной линии.

Совместное действие всех факторов, конечно же, увеличивало вероятность перекрытия изоляции.

ВЫВОДЫ

1. При расследовании причин случайных отключений ВЛ, связанных наиболее вероятно с перекрытием загрязненной и увлажненной изоляции, предлагается учитывать влияние локальных перенапряжений. Они могут формироваться, например, при отключении отпаек и/или сбросах нагрузки, подключенной к ним, и при работе устройств РПН на автотрансформаторах на конечных подстанциях. На отпайках с тяговыми ПС контактной сети переменного тока перенапряжения могут возникать при торможении и трогании с места тяжелых составов и т.д. Перенапряжения способны инициировать перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции линии, но оставаться незаметными для измерительных и регистрирующих приборов на конечных подстанциях вследствие высокой частоты и короткой длительности.
2. Необходимо провести расчеты реальных линий электропередачи с вариацией возможных переменных параметров и оценкой кратностей перенапряжений по всей трассе ВЛ. Для проверки выдвинутой гипотезы требуются экспериментальные регистрации перенапряжений на реальных ВЛ при коммутациях нагрузки на отпайках, при работе РПН и других случайных воздействиях.
3. Отдельный интерес представляет исследование механизма и оценка величины напряжений перекрытия увлажненной и загрязненной изоляции при сочетанном действии переменного напряжения и высокочастотных перенапряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gutman I., Solomonik E., Vosloo W. Research Provides Insight into Unexpected Line outages //INMR, Q4, 2011. С. 78–86.
2. Боровицкий В.Г., Овсянников А.Г. Проблемы утренних отключений воздушных линий электропередачи // Сб. докладов 4-й Российской научно-практической конференции «Линии электропередачи – 2010: Проектирование, Строительство, Опыт эксплуатации и научно-технический прогресс». Новосибирск: ЭЛСИ, 2010. С. 274–279.
3. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Программа МАЭС для численного моделирования сложных электроэнергетических схем: Руководство пользователя. Новосибирск: СибНИИЭ, 2006. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610081.
5. Лыкин А. В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. М.: Издательская группа «Логос», 2006.